

Sistem Pengendalian Cahaya Dan Suhu Pada Tanaman Hidroponik Berbasis Internet Of Things (Iot) Menggunakan Metode Fuzzy Logic

1st Michael Ramos Sinaga
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

michaelramos@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Muhammad Ary Murti
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

arymurti@telkomuniversity.ac.id

3rd Erwin Susanto
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

erwinelektro@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Sistem hidroponik merupakan salah satu inovasi pertanian *modern* yang memungkinkan budidaya tanaman tanpa media tanah dengan efisiensi tinggi. Dalam sistem hidroponik *indoor*, kestabilan suhu dan intensitas cahaya menjadi faktor penting yang mempengaruhi proses fotosintesis dan pertumbuhan tanaman. Penelitian ini merancang sistem pengendalian suhu dan cahaya berbasis *Internet of Things (IoT)* menggunakan metode *Fuzzy Logic Mamdani* untuk menjaga kondisi lingkungan tanaman tetap optimal. Sensor DHT22 digunakan untuk membaca suhu dan kelembapan, sedangkan sensor BH1750 mengukur intensitas cahaya. Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang mengolah data sensor dan mengirimkan data ke aplikasi Kodular melalui *Firestore Realtime Database* untuk monitoring secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki akurasi di atas 95%, sedangkan BH1750 mencapai 93-95%. Sistem mampu menjaga suhu stabil pada kisaran 28,5-29,1 °C dengan *error* 2%, dan intensitas cahaya 1.900-2.400 lux dengan *error* 5%. Waktu respon pengendalian suhu berkisar 1-4 menit dan cahaya 1-1,2 detik. Selama 14 hari pengamatan, tinggi tanaman selada meningkat dari 3 cm menjadi 15,3 cm dan pakcoy dari 3 cm menjadi 12,3 cm. Hasil penelitian membuktikan bahwa metode *Fuzzy Logic Mamdani* berbasis *Internet of Things (IoT)* efektif dan efisien dalam menjaga kestabilan lingkungan hidroponik *indoor*. Hasil ini membuktikan bahwa penerapan metode *Fuzzy Logic Mamdani* berbasis *Internet of Things (IoT)* efektif menjaga kestabilan lingkungan dan meningkatkan efisiensi energi pada sistem hidroponik.

Kata kunci — hidroponik, *fuzzy logic mamdani*, *internet of things*, DHT22, BH1750

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *Internet of Things (IoT)* mendorong terciptanya sistem otomasi di berbagai sektor, termasuk pertanian *modern*. Salah satu penerapannya ialah sistem hidroponik, yaitu metode budidaya tanaman tanpa tanah dengan media air bernutrisi. Metode ini memerlukan pengendalian lingkungan yang stabil, terutama pada suhu dan intensitas cahaya, karena dua faktor tersebut berpengaruh langsung terhadap proses fotosintesis dan laju pertumbuhan tanaman. Ketidakstabilan suhu dan cahaya menyebabkan penurunan kualitas hasil panen, terutama pada sistem hidroponik *indoor* yang mengandalkan pencahayaan buatan [1].

Sebagian besar petani hidroponik masih menggunakan sistem manual dalam mengatur suhu dan cahaya, sehingga membutuhkan pemantauan terus-menerus. Dalam konteks

tersebut, metode *Fuzzy Logic* menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi ketidakpastian pada variabel lingkungan karena dapat mengolah data linguistik seperti “panas”, “dingin”, atau “redup” secara fleksibel dan menyerupai cara berpikir manusia [2].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian otomatis suhu dan cahaya berbasis *Internet of Things (IoT)* dengan metode *Fuzzy Logic* tipe Mamdani. Sensor DHT22 digunakan untuk membaca suhu dan kelembapan udara, sedangkan BH1750 digunakan untuk mengukur intensitas cahaya di area tanaman. Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang mengolah data sensor dan mengirimkan data ke *Firestore Realtime Database*, serta menampilkan hasil pada aplikasi Android berbasis Kodular.

Sistem ini dirancang agar mampu mempertahankan kondisi optimal untuk pertumbuhan tanaman, yaitu suhu antara 28–32 °C dan intensitas cahaya sekitar 3100–3200 lux. Dengan adanya sistem otomatis ini, diharapkan efisiensi energi, stabilitas lingkungan, dan produktivitas tanaman hidroponik dapat meningkat secara signifikan.

II. KAJIAN TEORI

A. Hidroponik

Hidroponik adalah metode pertanian yang menggunakan air sebagai media utama untuk menanam tanaman, menggantikan penggunaan tanah. Sistem ini dapat diterapkan di lingkungan pertanian maupun rumah tangga, menjadikannya alternatif yang efisien dibandingkan metode konvensional. Hidroponik tidak memerlukan lahan luas dan dapat digunakan sepanjang tahun, baik di musim hujan maupun kemarau, tanpa tergantung pada musim tertentu seperti pertanian tradisional. Namun, sistem ini memiliki tantangan, terutama dalam pengelolaan parameter tertentu untuk memastikan hasil panen yang optimal dengan kualitas yang baik [3].

B. Sistem Pengendalian Suhu dan Cahaya

Cahaya adalah bentuk energi yang dapat dilihat oleh mata manusia dan merupakan bagian dari spektrum elektromagnetik. Sensor BH1750 dan lampu *Led grow lights* merupakan komponen penting dalam sistem pengendalian cahaya untuk tanaman hidroponik. Sensor BH1750 adalah perangkat pengukur intensitas cahaya yang berfungsi untuk mendeteksi cahaya lingkungan dalam satuan lux. Sensor ini menggunakan protokol komunikasi I2C, yang memudahkan integrasi dengan mikrokontroler seperti Arduino. Rentang pengukuran sensor ini sangat luas, mulai

dari 1 hingga 65.535 lux, dengan akurasi yang baik dan variasi pengukuran yang kecil, yaitu sekitar $\pm 20\%$ [4].

Pentingnya pengendalian intensitas cahaya menggunakan sensor BH1750 dan *Led grow lights* sebagai aktuator. Dalam penelitian ini, sistem dirancang untuk menjaga intensitas cahaya pada media tanam hidroponik agar tetap dalam batas yang diinginkan. Jika intensitas cahaya di sekitar media tanam berada di bawah nilai *setpoint* yang ditentukan, lampu LED akan aktif untuk meningkatkan pencahayaan. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk mengolah data dari sensor dan memberikan perintah kepada aktuator.

Oleh karena itu, dalam sistem hidroponik *indoor*, pengendalian cahaya harus diarahkan untuk memberikan intensitas dan spektrum yang tepat agar tanaman dapat tumbuh dengan optimal [5].

DHT22 adalah sensor yang berfungsi untuk mengukur suhu dan kelembaban udara relatif. Sensor ini memiliki kesetimbangan yang tinggi untuk penggunaan jangka panjang. DHT22 memiliki akurasi yang lebih baik daripada DHT22 dengan galat relatif pengukuran suhu 4% dan kelembaban 18% [6]. DHT22 memiliki jangkauan pengukuran suhu dari -40°C hingga 125°C , menjadikannya pilihan yang ideal untuk memantau kondisi lingkungan tanaman hidroponik [7]. Sensor DHT22 memiliki 4 kaki pin, tetapi yang dipakai hanya 3 kaki pin diantaranya VCC (+) merupakan tegangan *input* 5V, GND (-) atau *Ground* merupakan tegangan negatif, dan data yang merupakan pin data *output* serial [8].

Dalam sistem hidroponik yang dilakukan di dalam ruangan, pengendalian suhu sering kali dilakukan dengan memanfaatkan sensor dan perangkat otomatis. Sensor suhu seperti DHT22 dapat dimanfaatkan untuk memantau suhu secara *real-time* dan mengaktifkan sistem pendingin atau pemanas sesuai kebutuhan, sehingga menciptakan lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan tanaman [9].

C. Internet of Things

Internet of Things adalah sebuah teknologi yang terhubung dengan jaringan internet dan dapat diakses, dikontrol dan dikelola melalui perangkat *smart phone* atau *PC* [10]. Keberadaan IoT semakin penting terlihat dari banyaknya penerapan teknologi ini di berbagai aspek kehidupan saat ini. Salah satu bidang yang mengalami revolusi berkat IoT adalah pertanian *modern*, khususnya dalam sistem hidroponik.

Dengan memanfaatkan teknologi IoT, petani kini dapat memantau dan mengontrol kondisi lingkungan tanaman secara *real-time*, yang sangat krusial untuk memastikan pertumbuhan yang optimal. Sistem ini menggunakan berbagai sensor untuk mengukur parameter seperti suhu dan cahaya. Data yang dikumpulkan oleh sensor-sensor tersebut kemudian dikirimkan ke aplikasi berbasis *web* atau *mobile*, sehingga petani hidroponik dapat memperoleh informasi dan hasil secara *real-time* [11].

D. Fuzzy Logic

Fuzzy logic adalah suatu logika yang memiliki nilai kekaburan atau kesamaran (*fuzzyness*) antara benar atau salah [27]. *Fuzzy logic* Mamdani menggunakan konsep himpunan *fuzzy* dan aturan *fuzzy* untuk memodelkan ketidakpastian dan ambiguitas dalam sistem [12]. Metode ini menggunakan variabel linguistik sebagai *input* dan *output*, sehingga

memungkinkan penalaran yang lebih mirip dengan cara berpikir manusia [13].

Implementasi *fuzzy logic* ke dalam sistem melibatkan beberapa tahap yaitu membaca data sensor, melakukan fuzzifikasi, menerapkan aturan *fuzzy*, melakukan defuzzifikasi, dan mengirimkan sinyal kontrol ke aktuator seperti *dimmer* lampu dan sistem pendingin [14].

Implementasi dan rumus *Fuzzy Logic* Mamdani:

1. Fuzzifikasi

Pada tahap ini, nilai *crisp* dari *input* (intensitas cahaya dan suhu) diubah menjadi nilai *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan yang umum digunakan adalah segitiga atau trapesium. Data dari sensor DHT22 sebagai sensor suhu dan BH1750 sensor cahaya dikonversi menjadi variabel *fuzzy*. Suhu dapat dikategorikan sebagai rendah, normal, atau tinggi, sedangkan intensitas cahaya dapat diklasifikasikan sebagai gelap, redup, atau terang [15].

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (1)$$

2. Inferensi Fuzzy

Metode Mamdani menggunakan operasi min untuk *AND* dan *max* untuk *OR*. Aturan-aturan *fuzzy* dibuat berdasarkan kombinasi *input* dari sensor-sensor tersebut. Jika suhu tinggi dan intensitas cahaya terang, maka kurangi intensitas lampu dan aktifkan pendingin [15].

$$\mu_{Ri}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2)$$

3. Agregasi

Sistem mengevaluasi aturan-aturan *fuzzy* menggunakan metode Mamdani [16].

$$\mu_{agg}(y) = \max(\mu_{R1}(y), \mu_{R2}(y), \dots, \mu_{Rn}(y)) \quad (3)$$

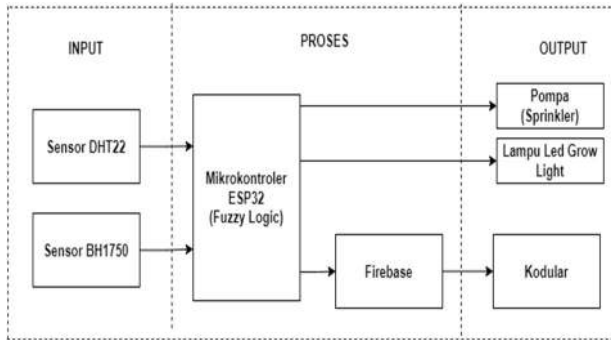
4. Defuzzifikasi

Output *fuzzy* diubah menjadi nilai *crisp* menggunakan metode centroid. Nilai ini kemudian digunakan untuk mengontrol aktuator, seperti pengaturan intensitas lampu LED atau aktivasi sistem pendingin [16].

$$y = \frac{\int y\mu(y)dy}{\int \mu(y)dy} \quad (4)$$

III. METODE

A. Desain Sistem



GAMBAR 1
Desain Sistem

Pada gambar 3.1 sistem ini menggunakan sub sistem 1 yang berwarna biru yang menggambarkan alur tentang pengendalian cahaya dan suhu pada tanaman hidroponik berbasis *internet of things (IoT)*. Sistem ini dimulai dengan 2 sensor utama yaitu sensor suhu dan cahaya yang terhubung ke ESP32 untuk pemrosesan data. Data dari sensor tersebut akan diproses untuk mengontrol dua aktuator yaitu Lampu *Led Grow Lights* dan pompa air untuk sebagai wadah ke sprinkler air. Selain itu, data dari ESP32 akan mengirim notifikasi ke aplikasi mobile untuk mengontrol dan memonitoring tanaman hidroponik. Sistem ini bertujuan untuk mengendalikan dan memonitoring suhu dan cahaya pada tanaman hidroponik agar tanaman bertumbuh dengan baik.

B. Perancangan *Fuzzy Logic* Mamdani

1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah input numerik hasil pembacaan sensor menjadi variabel linguistik yang dinyatakan dalam bentuk himpunan *fuzzy*. Pada sistem ini terdapat dua variabel input dan dua variabel output.

• Suhu (°C)

Data suhu diperoleh dari sensor DHT22. Rentang suhu yang digunakan adalah 0°C hingga 40°C, yang kemudian dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy*:

Dingin : 0°C-28°C

Normal : 28°C-32°C

Panas : 32°C-40°C

• Cahaya (lux)

Data intensitas cahaya diperoleh dari sensor BH1750. Rentang intensitas cahaya yang digunakan adalah 0-5000 lux, yang kemudian dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy*:

Rendah : 0-1.500 lux

Tinggi : 1.500-5.000 lux

2. Basis Aturan (*Rule Base*)

Basis aturan *fuzzy* merupakan inti dari sistem *Fuzzy Logic*, karena berisi kumpulan aturan yang menghubungkan input dengan output. Aturan disusun berdasarkan pengetahuan pakar serta kebutuhan tanaman hidroponik untuk tetap berada dalam kondisi lingkungan optimal.

Contoh aturan yang diterapkan adalah sebagai berikut:

1. *If* suhu *is* dingin *then* pompa *is* mati.
2. *If* suhu *is* normal *then* pompa *is* singkat.
3. *If* suhu *is* panas *then* pompa *is* cepat.
4. *If* cahaya *is* rendah *then* lampu *is* on.
5. *If* cahaya *is* tinggi *then* lampu *is* off.

Dengan aturan tersebut, sistem mampu mengombinasikan kondisi suhu dan cahaya untuk menghasilkan pengendalian yang lebih fleksibel.

3. Inferensi *Fuzzy* Mamdani

Inferensi *fuzzy* adalah proses pengambilan keputusan berdasarkan aturan yang sudah ditentukan. Pada penelitian ini digunakan metode inferensi Mamdani dengan operator:

- AND menggunakan operator *minimum*.
- OR menggunakan operator *maximum*.

Proses inferensi dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. Menentukan derajat keanggotaan dari setiap input hasil fuzzifikasi.
2. Mengaktifkan aturan-aturan yang sesuai berdasarkan input.
3. Menghasilkan himpunan *fuzzy* output melalui proses implikasi dengan operator minimum.
4. Mengombinasikan semua *output fuzzy* dari berbagai aturan menggunakan operator maksimum.

Sebagai contoh, jika suhu = 30°C dan cahaya = 400 lux, maka:

- Suhu dikategorikan normal ($\mu = 0,7$) dan Sebagian panas ($\mu = 0,3$).
- Cahaya dikategorikan rendah ($\mu = 0,8$).

Dari kondisi ini, aturan nomor 2 dan 3 akan aktif, dan sistem akan menghasilkan keluaran *fuzzy* berupa delay pompa untuk mengeluarkan air pada sprinkler (antara 1-3 menit) dan intensitas lampu (*ON*).

4. Defuzzifikasi

Hasil dari proses inferensi masih berupa himpunan *fuzzy* yang belum dapat dijalankan oleh aktuator. Oleh karena itu, dilakukan proses defuzzifikasi untuk mengubah keluaran *fuzzy* menjadi nilai *crisp*.

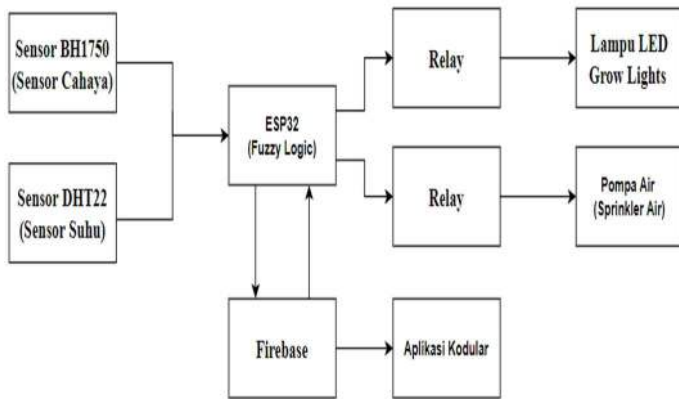
Metode defuzzifikasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *centroid* (*center of gravity*) karena mampu memberikan nilai yang representatif terhadap keseluruhan area fungsi keanggotaan output. Rumus *centroid* dinyatakan sebagai berikut:

$$z = \frac{\int \mu(z) \cdot z dz}{\int \mu(z) dz} \quad (5)$$

Hasil defuzzifikasi menghasilkan dua keluaran utama, yaitu:

- *Delay* pompa dalam satuan menit, yang akan digunakan mikrokontroler untuk mengatur frekuensi penyemprotan air.
- Intensitas lampu LED dalam bentuk persentase PWM, yang akan digunakan untuk mengatur tingkat kecerahan lampu grow light.

C. Diagram Blok Sistem

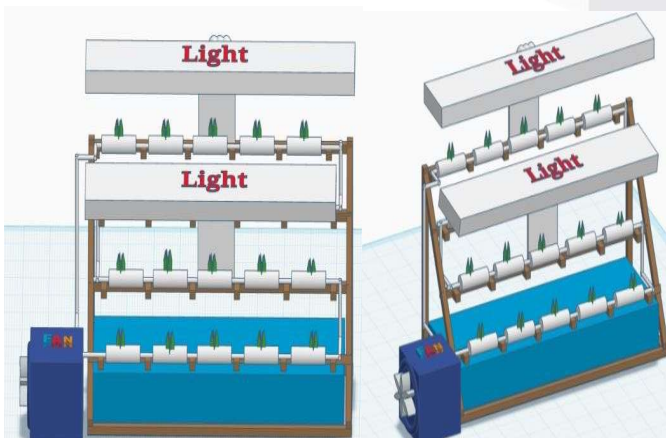


GAMBAR 2
Diagram Blok

Gambar 3.2 merupakan diagram blok yang menunjukkan sistem pada penelitian ini. Sistem dimulai dengan dua sensor utama yaitu Sensor BH1750 (Sensor Cahaya) dan Sensor DHT22 (Sensor Suhu) yang terhubung ke ESP32 sebagai unit pemroses utama. ESP32 juga terintegrasi dengan sistem *Fuzzy Logic* untuk pemrosesan data dari sensor. *Fuzzy logic* yang dipakai pada sistem ini adalah *Fuzzy Logic Mamdani*. Implementasi *Fuzzy Logic* untuk sistem ini adalah melakukan fuzzifikasi dengan data dari sensor DHT22 sebagai sensor suhu dan sensor BH1750 sebagai sensor cahaya dikonversikan menjadi variabel *fuzzy*. Suhu dapat dikategorikan rendah, normal, tinggi, sedangkan intensitas cahaya dapat di kategorikan gelap, redup, dan terang. Selanjutnya membuat aturan *fuzzy* dibuat berdasarkan kombinasi input dari sensor. Jika suhu tinggi dan intensitas cahaya terang, maka mengurangi intensitas lampu dan mengaktifkan pendingin. Setelah itu sistem akan mengevaluasi aturan-aturan *fuzzy* menggunakan metode mamdani.

Output dari ESP32 terbagi menjadi dua, pertama menuju dua relay yang masing-masing mengontrol Lampu *Led Grow Lights* dan Pompa Air untuk Sprinkler air yang telah defuzzifikasi dengan cara output *fuzzy* diubah menjadi nilai *crisp* menggunakan metode *centroid*. Sedangkan jalur kedua terhubung ke modul ESP32 yang berperan sebagai penghubung ke *Firestore*, yang kemudian terhubung ke Aplikasi Kodular untuk monitoring dan kontrol jarak jauh.

D. Desain Tanaman Hidroponik



GAMBAR 3

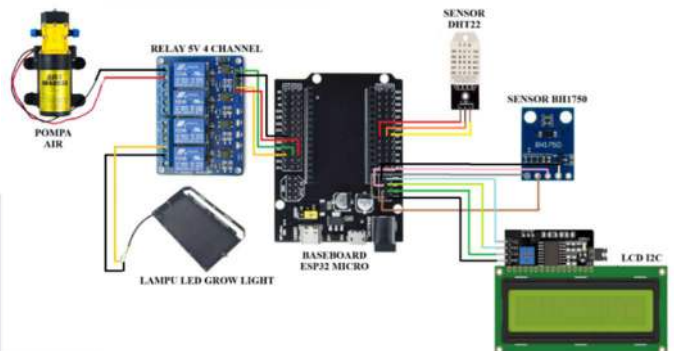
Desain Tanaman Hidroponik

Pada gambar 3.3 sistem hidroponik talang bertingkat merupakan solusi efektif untuk mengoptimalkan pemanfaatan lahan dalam budidaya tanaman. Desain ini terdiri dari beberapa tingkat rak yang disusun secara vertikal, dengan sistem pengairan yang mengalir dari atas ke bawah. Untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman, dapat menggunakan lampu *Led Grow Light* yang dipasang di bawah papan tersebut, menyinari setiap tingkat rak. Sensor DHT22 dapat ditempatkan di beberapa titik pada struktur untuk memantau suhu di sekitar tanaman. Sensor BH1750 dapat dipasang di dekat lampu *Led Grow Light* untuk mengukur intensitas cahaya yang diterima tanaman.

Intensitas cahaya menjadi faktor krusial dalam sistem hidroponik bertingkat. Tanaman yang berada di rak bagian atas mendapatkan pertumbuhan optimal karena mendapat paparan sinar matahari yang cukup, sementara rak tengah dan bawah memiliki pertumbuhan yang lebih moderat. Kondisi *indoor*, penggunaan lampu LED dapat menjadi solusi efektif. Lampu *led grow light* dengan daya 100 watt menunjukkan hasil terbaik untuk pertumbuhan tanaman.

Pompa air untuk sprinkler dapat dipasang di bagian bawah struktur dan sprinkler air ini berperan penting dalam sirkulasi udara dan pengaturan suhu, yang dapat diaktifkan secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor DHT22. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk memantau dan mengontrol lingkungan pertumbuhan tanaman secara efisien, memastikan kondisi optimal untuk pertumbuhan tanaman hidroponik. Arduino Atmega328 dapat berfungsi sebagai mikrokontroler utama yang mengumpulkan data dari sensor-sensor tersebut.

E. Desain Perangkat Keras

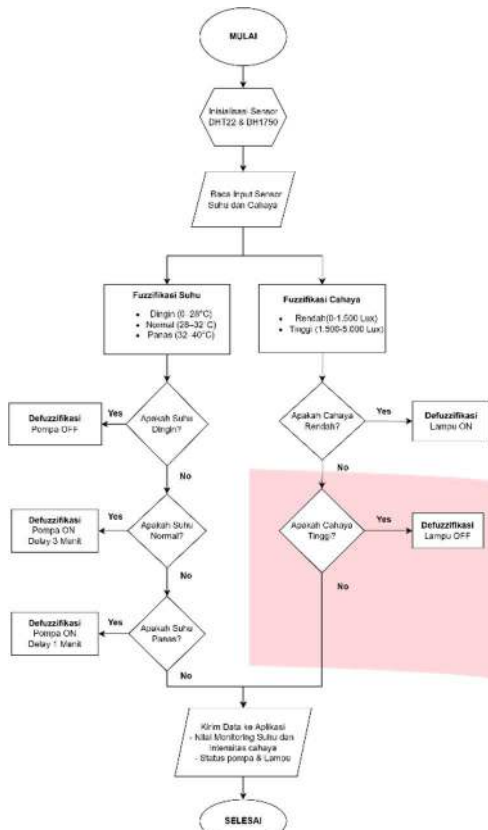


GAMBAR 4

Desain Perangkat Keras

Gambar 3.4 merupakan desain perangkat keras pada penelitian ini yang terdiri dari inpu sensor suhu (DHT22) dan sensor cahaya (BH1750). Data dari sensor akan diproses ESP32. Data yang sudah diolah ESP32 akan dikirimkan ke database untuk kemudian dikirimkan ke aplikasi pengguna. Relay yang terhubung dengan ESP32 akan mengontrol dan mengaktifkan aktuator pompa air dan lampu.

F. Flowchart



GAMBAR 5
Flowchart Sistem

Flowchart pada Gambar 3.12 menjelaskan alur kerja sistem pengendalian suhu dan cahaya berbasis IoT dengan metode *Fuzzy Logic* Mamdani. Proses dimulai dengan inisialisasi sensor DHT22 dan BH1750 sebagai perangkat utama untuk memperoleh data suhu dan intensitas cahaya secara *real-time*. Setelah proses inisialisasi selesai, sistem membaca *input* kedua sensor untuk mengetahui kondisi lingkungan aktual pada unit hidroponik. Data yang diperoleh kemudian diproses melalui tahapan *fuzzy logic*, yang meliputi fuzzifikasi, inferensi berbasis rule base, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan keputusan pengendalian yang tepat. Hasil pemrosesan *fuzzy* digunakan sebagai dasar untuk menentukan status aktuatur berupa pompa air dan lampu LED *grow light* sesuai kategori suhu dan cahaya yang terdeteksi.

Selanjutnya, setelah keputusan pengendalian dihasilkan, sistem mengeksekusi perintah kepada aktuatur untuk menjaga suhu dan cahaya tetap berada pada rentang optimal bagi pertumbuhan tanaman hidroponik. Pompa air akan menyala atau mati berdasarkan kategori suhu (dingin, normal, atau panas), sementara lampu LED akan diaktifkan atau dinonaktifkan berdasarkan kondisi intensitas cahaya (rendah atau tinggi). Sistem kemudian mengirimkan data monitoring ke aplikasi berbasis IoT sehingga pengguna dapat memantau suhu, intensitas cahaya, serta status aktuatur secara langsung melalui perangkat seluler. Dengan demikian, flowchart ini menggambarkan mekanisme kerja sistem pengendalian otomatis yang bersifat adaptif, berkelanjutan, dan mampu menjaga stabilitas lingkungan tanaman tanpa memerlukan intervensi manual.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

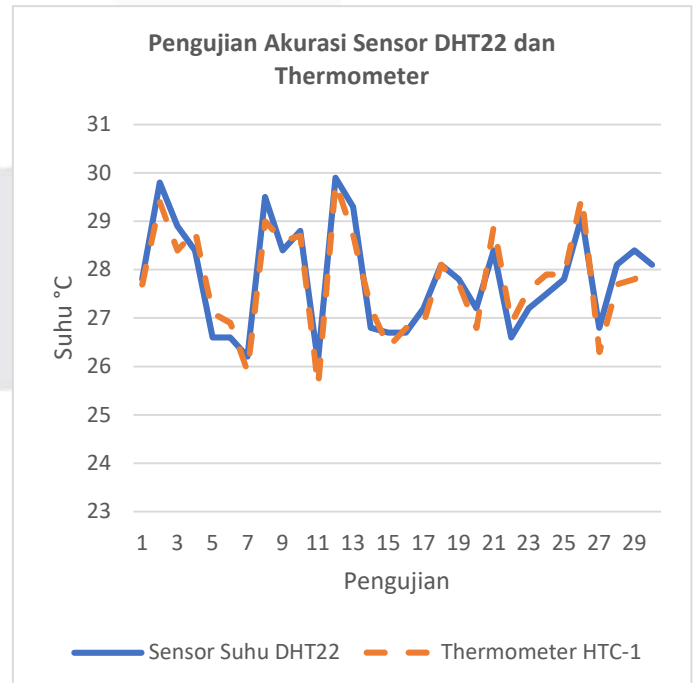
A. Pengujian Akurasi Sensor

1. Pengujian Sensor Suhu DHT22



GAMBAR 6
Hasil Pengujian Akurasi Sensor DHT22

Pengujian sensor suhu DHT22 dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor terhadap nilai referensi dari alat ukur standar yaitu Thermometer Digital HTC-1. Metode pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan suhu yang ditampilkan oleh sensor DHT22 dengan nilai yang ditunjukkan oleh *thermometer digital*. Pengambilan data dilakukan sebanyak 30 kali pengukuran secara berurutan dalam kondisi suhu ruangan normal, yaitu berkisar antara 26°C hingga 30°C. Setiap pengambilan data dilakukan dengan jeda waktu stabilisasi kurang lebih satu menit, untuk memastikan tidak ada pengaruh fluktuasi suhu lingkungan yang signifikan selama proses pengukuran.



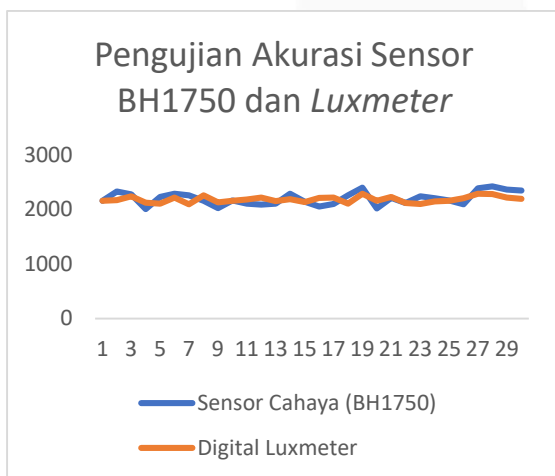
GAMBAR 7
Grafik Pengujian Akurasi Sensor DHT22 dan Thermometer

Grafik pada Gambar 4.2 memperlihatkan perbandingan hasil pengukuran suhu antara sensor DHT22 dengan Thermometer HTC-1 sebagai alat pembanding. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa pola data dari sensor DHT22 mengikuti tren yang sama dengan Thermometer HTC-1. Selisih pengukuran relatif kecil, yaitu berkisar antara 0,1-0,5 °C, sehingga menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik. Hal ini mengindikasikan bahwa sensor DHT22 layak digunakan untuk pengukuran suhu pada sistem pengendalian hidroponik karena mampu memberikan hasil yang konsisten dan mendekati nilai sebenarnya.

Dari keseluruhan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa sensor DHT22 layak digunakan sebagai sensor pengukuran suhu dalam sistem pengendalian suhu tanaman hidroponik. Error pengukuran yang relatif kecil masih berada dalam batas toleransi sesuai datasheet DHT22, yang menyatakan toleransi error maksimal sebesar 0,5°C. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengendalian suhu berbasis *fuzzy logic* dengan masukan dari sensor DHT22 dapat dioperasikan dengan tingkat keandalan yang baik, terutama dalam menjaga kestabilan suhu lingkungan tanaman hidroponik.

2. Pengujian Sensor Cahaya BH1750

Pengujian sensor BH1750 dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi pembacaan intensitas cahaya yang dihasilkan oleh sensor terhadap alat ukur pembanding berupa *luxmeter digital*. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sensor cahaya yang digunakan dalam sistem hidroponik mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat dan dapat diandalkan dalam proses pengendalian otomatisasi lampu berbasis *fuzzy logic*. Pengujian akurasi sensor menjadi penting karena kesalahan pembacaan cahaya dapat mempengaruhi kinerja pengendalian lampu, sehingga mempengaruhi kondisi pencahayaan tanaman hidroponik. Metode pengujian dilakukan dengan cara membandingkan pembacaan BH1750 dengan *luxmeter digital* dalam kondisi pencahayaan variatif sebanyak 30 kali pengambilan data.



GAMBAR 8

Grafik Pengujian Akurasi Sensor BH1750 dan Luxmeter

Grafik pada Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan intensitas cahaya yang diukur oleh sensor BH1750 dengan alat *Luxmeter* sebagai acuan. Secara umum, kedua garis pada grafik memiliki kecenderungan pola yang sama, meskipun terdapat beberapa deviasi pada titik pengukuran tertentu.

Selisih pengukuran yang terjadi umumnya berada pada rentang 50–160 lux, dengan rata-rata akurasi lebih dari 93%. Hal ini membuktikan bahwa sensor BH1750 cukup andal dalam mengukur intensitas cahaya dan sesuai digunakan pada sistem hidroponik untuk mendeteksi kebutuhan pencahayaan tanaman.



GAMBAR 9

Hasil Pengujian Akurasi Sensor BH1750

B. Pengujian Respon Waktu Pendinginan Pompa

Pengujian respon waktu pendinginan pompa air dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem *fuzzy logic* Mamdani dalam mengendalikan suhu lingkungan tanaman hidroponik secara otomatis. Pengujian dilakukan dengan cara memanaskan sensor suhu DHT22 menggunakan *hair dryer* hingga suhu lingkungan mencapai kategori “panas” ($\geq 32^{\circ}\text{C}$), kemudian diamati berapa lama waktu yang dibutuhkan sistem untuk menurunkan suhu hingga kembali stabil pada nilai $\leq 28^{\circ}\text{C}$. Saat sensor mendeteksi suhu melebihi ambang batas, sistem secara otomatis mengaktifkan pompa air (sprinkler) untuk menyemprotkan air sebagai media pendinginan.

TABEL 1

Hasil Pengujian Respon Waktu Pompa Air\

No	Kategori Suhu (Awal)	Waktu Pompa ON	Waktu Suhu Turun dan Stabil ($\leq 28^{\circ}\text{C}$)	Durasi Penurunan Suhu (Menit)	Suhu Akhir ($^{\circ}\text{C}$)
1	Normal ($28,6^{\circ}\text{C}$)	09:00	09:04:18	4 menit 18 detik	$26,4^{\circ}\text{C}$
2	Normal ($29,0^{\circ}\text{C}$)	09:10	09:14:12	4 menit 12 detik	$26,1^{\circ}\text{C}$
3	Normal ($30,5^{\circ}\text{C}$)	09:20	09:24:36	4 menit 36 detik	$27,3^{\circ}\text{C}$
4	Panas ($32,8^{\circ}\text{C}$)	09:30	09:31:12	1 menit 12 detik	$27,1^{\circ}\text{C}$
5	Panas ($33,5^{\circ}\text{C}$)	09:35	09:36:09	1 menit 09 detik	$27,5^{\circ}\text{C}$
6	Panas ($34,0^{\circ}\text{C}$)	09:40	09:41:15	1 menit 15 detik	$27,8^{\circ}\text{C}$
7	Panas ($33,2^{\circ}\text{C}$)	09:45	09:46:21	1 menit 21 detik	$27,3^{\circ}\text{C}$
8	Normal ($30,8^{\circ}\text{C}$)	09:50	09:54:20	4 menit 20 detik	$27,5^{\circ}\text{C}$
9	Normal ($31,2^{\circ}\text{C}$)	09:55	09:59:18	4 menit 18 detik	$27,6^{\circ}\text{C}$
10	Dingin ($30,9^{\circ}\text{C}$)	10:05	10:09:10	4 menit 10 detik	$27,2^{\circ}\text{C}$

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.1 suhu awal berkisar antara $28,6^{\circ}\text{C}$ hingga $33,5^{\circ}\text{C}$. Waktu pendinginan bervariasi tergantung kategori suhu awal, di mana pada kondisi suhu tinggi (panas), durasi penurunan suhu relatif lebih singkat, yaitu sekitar 1 menit 9 detik hingga 1 menit 21 detik, sedangkan pada kondisi suhu normal dan dingin, waktu pendinginan lebih lama, berkisar antara 4 menit 10 detik hingga 4 menit 36 detik. Setelah proses pendinginan selesai, suhu akhir sistem stabil pada kisaran $26,1^{\circ}\text{C}$ hingga $27,8^{\circ}\text{C}$,

yang berarti sistem berhasil mengembalikan suhu ke kondisi ideal bagi tanaman hidroponik.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem fuzzy logic mamdani terbukti mampu memberikan respon cepat dan efektif dalam menjaga kestabilan suhu lingkungan hidroponik. Respon kerja pompa air sesuai dengan aturan *fuzzy* yang dirancang, yaitu pompa *OFF* pada suhu dingin ($\leq 28^{\circ}\text{C}$), pompa aktif setiap 3 menit pada suhu normal ($28-32^{\circ}\text{C}$), dan pompa aktif setiap 1 menit pada suhu panas ($\geq 32^{\circ}\text{C}$). Durasi pendinginan yang lebih cepat pada kategori suhu panas menunjukkan bahwa sistem mampu beradaptasi terhadap perubahan lingkungan dengan tingkat respon yang baik. Sementara itu, durasi pendinginan yang lebih panjang pada suhu normal atau dingin menunjukkan bahwa *fuzzy logic* berhasil menyesuaikan waktu kerja pompa agar tidak terjadi penyemprotan berlebihan. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan kinerja stabil, konsisten, dan adaptif terhadap perubahan suhu, dengan respon kendali rata-rata yang cepat tanpa adanya keterlambatan signifikan antara pembacaan sensor dan aktivasi pompa. Hal ini membuktikan bahwa penerapan *fuzzy logic* mamdani pada pengendalian suhu berbasis pompa air efektif dalam menjaga suhu optimal pertumbuhan tanaman hidroponik *indoor* serta mampu bekerja secara *real-time* tanpa memerlukan intervensi manual dari pengguna.

C. Pengujian Respon Intensitas Cahaya *Led Grow Light*

Pengujian kinerja otomatisasi lampu dilakukan untuk menguji kemampuan sistem dalam merespon perubahan intensitas cahaya lingkungan secara otomatis melalui implementasi metode *fuzzy logic*. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa lampu grow light dapat menyala atau mati secara otomatis berdasarkan kondisi lux yang terdeteksi oleh sensor BH1750. Dalam pengujian ini, intensitas cahaya dibagi menjadi dua kategori yaitu kategori rendah (0-1.500 lux) dan kategori tinggi (1.500-5.000 lux), sesuai dengan kebutuhan intensitas pencahayaan tanaman hidroponik. Berikut adalah tabel hasil pengujian respon waktu pada lampu *led grow light*.

TABEL 2
Hasil Pengujian Respon Waktu Lampu *Led Grow Light*

No	Jarak Senter	Lux Sebelum (lux)	Lux Saat Berubah (lux)	Waktu Perubahan	Durasi Waktu Lampu Berubah	Respon (s)	Status Akhir
1	2 cm	1.420	1.910	09:00:00	09:00:01.0	1.0	OFF
2	4 cm	1.400	1.870	09:02:00	09:02:01.1	1.1	OFF
3	6 cm	1.390	1.820	09:04:00	09:04:01.0	1.0	OFF
4	8 cm	1.410	1.770	09:06:00	09:06:01.1	1.1	OFF
5	10 cm	1.430	1.720	09:08:00	09:08:01.2	1.2	OFF
6	12 cm	1.510	1.020	09:10:00	09:10:01.0	1.0	ON
7	14 cm	1.550	1.080	09:12:00	09:12:01.1	1.1	ON
8	16 cm	1.580	1.130	09:14:00	09:14:01.1	1.1	ON
9	18 cm	1.600	1.180	09:16:00	09:16:01.2	1.2	ON
10	20 cm	1.620	1.230	09:18:00	09:18:01.1	1.1	ON

Pengujian respon intensitas cahaya dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem kendali berbasis *fuzzy logic* mamdani dalam merespons perubahan intensitas cahaya pada sistem hidroponik *indoor*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan senter yang diarahkan ke sensor cahaya BH1750 pada berbagai jarak, mulai dari 2 cm hingga 20 cm,

untuk mensimulasikan peningkatan dan penurunan intensitas cahaya secara bertahap. Nilai lux sebelum perubahan berada pada kisaran 1.380-1.430 lux, sedangkan saat senter mendekati ke sensor, nilai lux meningkat hingga 1.720-1.910 lux, melewati ambang batas *fuzzy* sebesar 1.500 lux. Ketika intensitas cahaya melebihi nilai tersebut, sistem secara otomatis memberikan perintah untuk mematikan *Led Grow Light* (status *OFF*) sebagai bentuk pengendalian untuk menjaga kestabilan pencahayaan tanaman hidroponik. Sebaliknya, ketika jarak senter semakin jauh dari sensor dan nilai lux turun hingga 1.020-1.230 lux, sistem akan memberikan perintah untuk menyalakan kembali *Led Grow Light* (status *ON*) agar tingkat pencahayaan di sekitar tanaman tetap optimal.

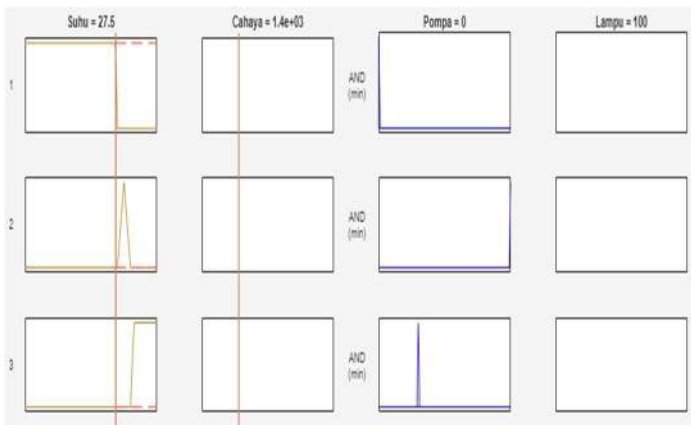
Berdasarkan data hasil pengujian pada Tabel 4.2, sistem mampu memberikan respon yang sangat cepat terhadap perubahan intensitas cahaya dengan waktu respon rata-rata sekitar 1,1 detik, sesuai dengan parameter *delay* yang telah ditentukan pada program ESP32. Waktu respon yang konstan pada kisaran 1,0-1,2 detik menunjukkan bahwa proses pembacaan sensor BH1750, serta eksekusi aktuatur berupa relay lampu dapat berjalan secara *real-time* tanpa adanya keterlambatan signifikan. Selain itu, sistem juga menunjukkan kemampuan adaptif terhadap dua kondisi operasi, yakni status *OFF* ketika intensitas cahaya berlebih dan status *ON* ketika intensitas cahaya berkurang, sesuai dengan aturan *fuzzy* yang telah dirancang.

Hasil pengujian ini membuktikan bahwa sistem pengendalian cahaya berbasis *fuzzy logic* mamdani memiliki performa kendali yang cepat, akurat, dan stabil dalam menjaga intensitas cahaya di lingkungan hidroponik *indoor*. Tidak ditemukan adanya perubahan status lampu yang berulang (berkedip), yang menandakan bahwa sistem bekerja secara halus dan efisien. Dengan demikian, penerapan logika fuzzy pada pengendalian *LED Grow Light* terbukti efektif dalam menjaga stabilitas pencahayaan tanaman hidroponik serta membantu mempertahankan kondisi intensitas cahaya ideal untuk mendukung proses fotosintesis tanaman secara optimal di lingkungan indoor.

D. Pengujian Suhu terhadap Respon Waktu dengan *Fuzzy Logic Mamdani*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana sistem *fuzzy logic* Mamdani merespons perubahan suhu terhadap pengendalian delay waktu penyemprotan pompa air. Suhu merupakan salah satu parameter penting pada budidaya hidroponik, karena fluktuasi suhu berpengaruh langsung terhadap stabilitas lingkungan tumbuh tanaman. Oleh karena itu, sistem *fuzzy* dirancang untuk dapat mendeteksi perubahan suhu secara *real-time* dan menentukan keputusan kapan pompa harus diaktifkan atau dinonaktifkan agar kelembaban dan suhu tetap stabil.

- 27,5 °C

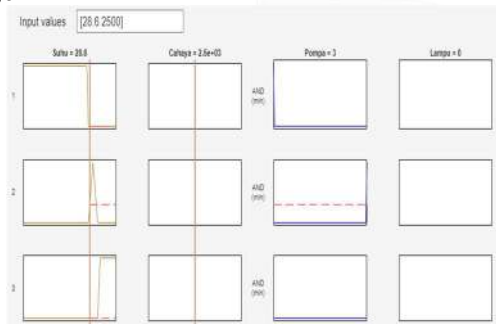


GAMBAR 10

Pengujian Suhu 27,5° C Pada Matlab

Pada kondisi suhu 27,5 °C, sistem menginterpretasikan bahwa suhu masih berada dalam kategori dingin. Pada kategori ini, tanaman tidak memerlukan pendinginan tambahan karena suhu sudah berada di bawah ambang batas kebutuhan normal. Oleh karena itu, pompa berada dalam kondisi tidak aktif (*delay* 0 menit). Dengan demikian, keputusan pompa mati pada suhu dingin ini bertujuan untuk menjaga keseimbangan lingkungan tanaman dan efisiensi penggunaan air.

- 28,6 °C



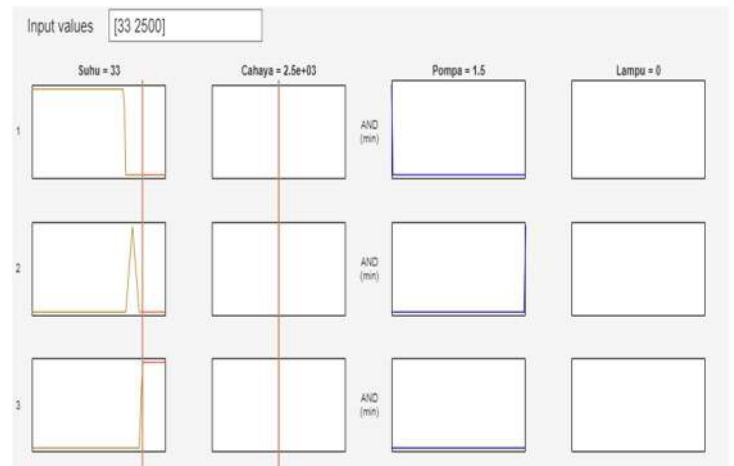
GAMBAR 11

Pengujian Suhu 28,6° C Pada Matlab

Ketika suhu meningkat ke 28,6 °C, sistem mulai mengenali bahwa kondisi lingkungan berada dalam kategori normal. Pada kategori ini, pompa bekerja dengan *delay* 3 menit, artinya penyemprotan dilakukan secara periodik setiap 3 menit.

Sistem *fuzzy* menilai bahwa suhu normal membutuhkan irigasi tambahan agar lingkungan tetap sesuai untuk pertumbuhan tanaman, namun tidak memerlukan frekuensi tinggi. Dengan demikian, keputusan *delay* 3 menit menjadi solusi kompromi untuk menjaga kestabilan suhu dan kelembapan dalam kondisi normal.

- 33 °C



GAMBAR 12

Pengujian Suhu 33° C Pada Matlab

Pada kondisi suhu 33 °C, sistem mendeteksi lingkungan dalam kategori panas. Suhu ini berpotensi mengganggu metabolisme tanaman jika tidak segera dikendalikan. Oleh karena itu, sistem *fuzzy* memberikan keputusan agar pompa bekerja dengan *delay* yang sangat singkat (1 menit), sehingga penyemprotan air berlangsung lebih sering. Dengan mengaktifkan pompa secara intensif, sistem *fuzzy* membantu menstabilkan kondisi mikroklimat di sekitar tanaman, sehingga fotosintesis tetap dapat berlangsung optimal meskipun suhu tinggi.

Berikut adalah perhitungan manual menggunakan *fuzzy logic* menggunakan tabel pengujian suhu terhadap respon waktu menggunakan metode *fuzzy logic*:

1. Fuzzifikasi

Mengubah *input crisp* menjadi derajat keanggotaan ke dalam himpunan *fuzzy*. Fungsi keanggotaan segitiga yang digunakan adalah:

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a < x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases}$$

Untuk suhu normal 28°C hingga 32°C

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} \frac{x - 28}{2}, & 28 < x \leq 30 \\ \frac{32 - x}{2}, & 30 < x < 32 \end{cases}$$

Perhitungan dari hasil pengujian:

- Suhu 27.5°C (Kategori dingin)

$$\mu_{Dingin}(x) = \frac{28 - 27.5}{28 - 25} = 0.167$$

- Suhu 28.6°C (Kategori normal)

$$\mu_{Normal}(x) = \frac{30 - 28.6}{2} = 0.7$$

- Suhu 33.0°C (Kategori panas)

$$\mu_{Panas}(x) = \frac{33 - 32}{4} = 0.25$$

2. Defuzzifikasi

Output berbentuk diskrit (0, 1, dan 3 menit), digunakan metode *weighted average*:

$$z = \frac{\sum(\alpha_i \cdot z_i)}{\sum \alpha_i}$$

- Suhu 28.6°C (Kategori normal)

$$\alpha = 0.7 \rightarrow Delay = 3$$

$$z = \frac{(0.7 \cdot 3)}{0.7} = 3$$

- Suhu 33.0°C (Kategori panas)

$$\alpha = 0.25 \rightarrow Delay = 1$$

$$z = \frac{(0.25 \cdot 1)}{0.25} = 1$$

- Suhu 27.5°C (Kategori dingin)

$$\alpha = 0.167 \rightarrow Delay = 0$$

$$z = \frac{(0.167 \cdot 0)}{0.167} = 0$$

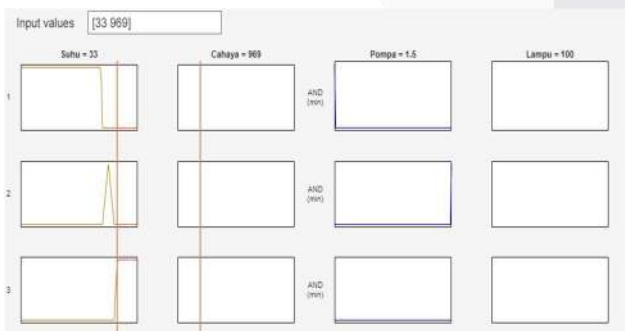
Desain ini menghasilkan pola kerja pompa yang fleksibel, dengan frekuensi penyemprotan meningkat seiring dengan kenaikan suhu lingkungan. Sistem ini membantu menjaga suhu lingkungan tetap terkendali secara otomatis tanpa intervensi manual.

E. Pengujian Cahaya terhadap Respon Waktu dengan *Fuzzy Logic Mamdani*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana sistem *fuzzy logic Mamdani* memberikan keputusan terhadap status lampu *led grow light* berdasarkan kondisi intensitas cahaya yang terdeteksi oleh sensor BH1750. Lampu *grow light* berfungsi sebagai sumber cahaya tambahan yang sangat penting dalam sistem hidroponik *indoor*, terutama ketika intensitas cahaya alami yang masuk ke ruang tanam tidak mencukupi untuk proses fotosintesis.

Dalam sistem ini, intensitas cahaya dibagi menjadi dua kategori utama yaitu Rendah dan Tinggi. Ketika intensitas cahaya rendah, tanaman membutuhkan dukungan cahaya buatan sehingga lampu harus dinyalakan. Sebaliknya, ketika intensitas cahaya tinggi, lampu harus dimatikan agar tanaman tidak menerima kelebihan cahaya yang dapat berdampak negatif, seperti stres cahaya atau peningkatan suhu lingkungan yang berlebihan.

- 969 Lux (Rendah)



GAMBAR 13

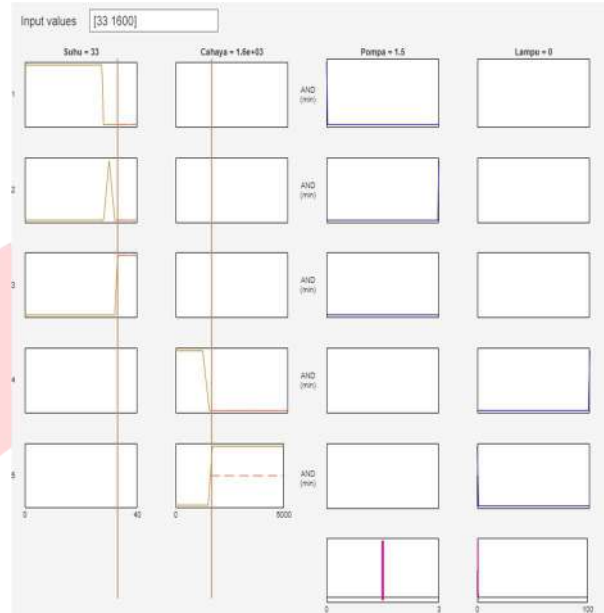
Pengujian Cahaya 969 Lux Pada Matlab

Pada saat sensor mendeteksi intensitas cahaya sebesar 969 Lux, sistem *fuzzy* mengategorikannya sebagai cahaya rendah. Berdasarkan aturan inferensi *fuzzy*, lampu *led grow light* dinyalakan dengan kondisi ON penuh (100%).

Keputusan ini sangat penting karena intensitas 969 Lux berada di bawah kebutuhan optimum tanaman untuk proses

fotosintesis. Dengan menyalakan lampu secara penuh, sistem memastikan bahwa tanaman tetap memperoleh cahaya yang cukup untuk melakukan fotosintesis secara normal. Tanpa pencahayaan tambahan pada kondisi rendah ini, pertumbuhan tanaman dapat terganggu, misalnya daun menjadi pucat, batang lebih panjang (etiolasi), dan produktivitas tanaman menurun.

- 1600 Lux (Tinggi)



GAMBAR 14

Pengujian Cahaya 1600 Lux Pada Matlab

Pada kondisi intensitas cahaya sebesar 1600 Lux, sensor mendeteksi bahwa nilai ini sudah masuk dalam kategori cahaya tinggi. Oleh karena itu, sistem *fuzzy* memutuskan untuk mematikan lampu (OFF atau 0%).

Keputusan ini sangat relevan karena pada kondisi intensitas tinggi, tanaman sudah mendapatkan cukup cahaya untuk melakukan fotosintesis secara optimal. Jika lampu tetap dinyalakan, justru berpotensi menimbulkan efek negatif seperti *overexposure* cahaya yang dapat merusak jaringan daun, meningkatkan suhu ruangan, dan mengurangi efisiensi energi sistem.

Berikut adalah perhitungan manual menggunakan *fuzzy logic* menggunakan tabel pengujian cahaya terhadap respon waktu menggunakan metode *fuzzy logic*:

1. Fuzzifikasi

Fungsi keanggotaan segitiga:

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases}$$

Untuk himpunan Rendah 0 hingga 1500 lux:

$$\mu_{Rendah}(x) = \frac{1500 - x}{750}, \quad \text{untuk } 750 < x \leq 1500$$

- Nilai 969 lux

$$\mu_{Rendah} = \frac{1500 - 969}{750} = 0,707$$

- Nilai 1.600 lux

$$\mu_{Rendah} = \frac{1.500 - 1.600}{1.750} = 0,057$$

2. Defuzzifikasi

Karena *output* bersifat biner (*ON/OFF*), maka defuzzifikasi cukup memilih nilai dengan derajat keanggotaan tertinggi.

1. Lux 969 $\rightarrow \mu_{Rendah} = 0,707 \rightarrow \text{Lampu} = \text{ON}$

2. Lux 1.600 $\rightarrow \mu_{Tinggi} = 0,057 \rightarrow \text{Lampu} = \text{OFF}$

Pengendalian lampu juga dipadukan dengan logika waktu, dimana lampu secara otomatis selalu *ON* pada malam hari (18:00–06:00), serta dinamis *ON/OFF* mengikuti *fuzzy logic* pada siang hari (06:00–18:00). Desain ini memastikan kebutuhan pencahayaan tanaman terpenuhi sepanjang hari sekaligus meningkatkan efisiensi energi.

F. Pengujian Performansi Sistem Kendali *Fuzzy Logic* Mamdani

Pengujian performansi sistem kendali dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem *Fuzzy Logic* Mamdani dalam mempertahankan kestabilan suhu dan intensitas cahaya pada sistem hidroponik. Pengujian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kecepatan respon sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan serta mengukur tingkat kesalahan (*error*) antara nilai keluaran sistem dengan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Nilai *setpoint* yang digunakan yaitu 29°C untuk suhu dan 2.200 lux untuk intensitas cahaya sesuai dengan kebutuhan optimal pertumbuhan tanaman hidroponik selada dan pakcoy.

Prosedur pengujian dilakukan dengan memanfaatkan hasil uji sebelumnya, yaitu pengujian suhu terhadap respon waktu dan pengujian cahaya terhadap respon waktu. Data tersebut digunakan untuk menganalisis karakteristik performansi sistem kendali dari sisi waktu respon, kestabilan, serta nilai *error* rata-rata terhadap *setpoint*. Nilai pembacaan sensor DHT22 dan BH1750 dibandingkan dengan nilai referensi untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengembalikan kondisi suhu dan cahaya ke keadaan stabil.

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bahwa sistem kendali berbasis *Fuzzy Logic* Mamdani mampu bekerja secara adaptif terhadap perubahan lingkungan. Sistem dapat menjaga suhu dan cahaya pada kondisi stabil dengan nilai *error* yang relatif kecil. Hasil ringkasan pengujian performansi sistem kendali ditunjukkan pada Tabel 4.4 di bawah ini.

TABEL 3

Hasil Ringkasan Pengujian Performansi Sistem Kendali

Parameter	Nilai <i>Setpoint</i>	Nilai Aktual	Nilai <i>Setpoint</i> Respon Waktu	Respon Waktu	<i>Error</i> Rata-Rata	Keterangan
Suhu (°C)	29	28.5-29.1	5 menit	1-4 menit	0.6 °C (2%)	Stabil
Cahaya (lux)	2.200	1.900-2.400	3 detik	1-1,2 detik	150 lux (5%)	Stabil

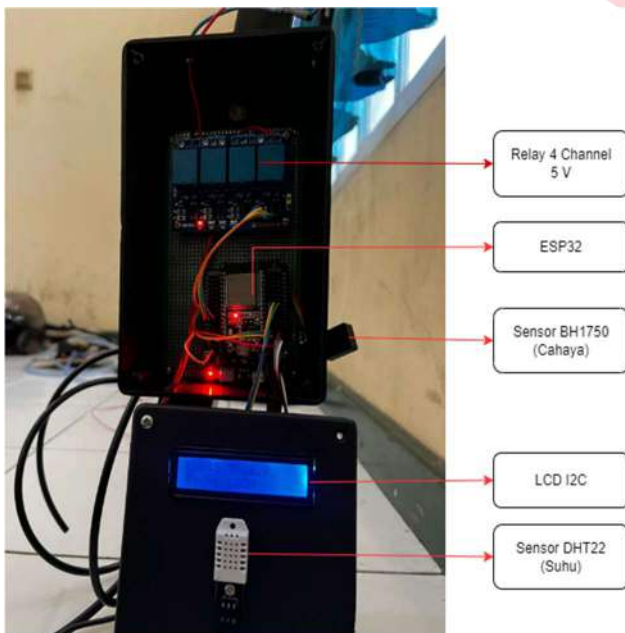
Berdasarkan Tabel 4.4, sistem pengendalian mampu mempertahankan suhu pada kisaran nilai *setpoint* 29°C

dengan nilai aktual antara 28,5-29,1°C, sehingga menghasilkan *error* rata-rata sebesar 0,6°C atau sekitar 2%. Pada parameter pencahayaan, nilai aktual berada pada rentang 1.900-2.400 lux dari nilai *setpoint* 2.200 lux, dengan *error* rata-rata sekitar 150 lux atau 5%. Evaluasi terhadap performansi waktu respon menunjukkan bahwa pengendalian suhu mampu mencapai kestabilan kembali dalam rentang 1-4 menit, yang masih berada di bawah nilai *setpoint* respon waktu sebesar 5 menit. Sementara itu, respon terhadap perubahan intensitas cahaya berlangsung sangat cepat, yaitu sekitar 1-1,2 detik, sehingga memenuhi *setpoint* respon waktu sebesar 3 detik. Hasil tersebut membuktikan bahwa sistem kendali berbasis *Fuzzy Logic* Mamdani mampu beroperasi secara efektif dalam menjaga kestabilan suhu dan intensitas cahaya karena seluruh nilai aktual, *error*, dan waktu respon berada dalam batas toleransi yang ditetapkan.

Pada pengendalian suhu, ketika sensor mendeteksi nilai di atas 32°C, sistem mengatur pompa untuk bekerja dengan *delay* lebih cepat, yaitu sekitar 1 menit, sehingga percepatan sirkulasi air dapat menurunkan suhu menuju nilai *setpoint*. Pada kondisi suhu berada dalam rentang 28-32°C, sistem memberikan *delay* yang lebih lambat, yaitu 3 menit, untuk menjaga suhu tetap stabil tanpa memicu fluktuasi berlebih. Mekanisme ini menunjukkan bahwa proses inferensi *fuzzy* memberikan keluaran yang proporsional terhadap perubahan kondisi lingkungan. Pada sisi pencahayaan, lampu *LED Grow Light* diaktifkan secara otomatis ketika intensitas cahaya turun di bawah 1.500 lux, dan dinonaktifkan ketika pencahayaan telah kembali melampaui ambang tersebut. Waktu respon yang hanya sekitar 1 detik memperlihatkan bahwa algoritma *fuzzy* mampu menghasilkan keputusan secara *real-time* tanpa keterlambatan signifikan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian memperlihatkan bahwa sistem pengendalian suhu dan cahaya berbasis *Fuzzy Logic* Mamdani memiliki performansi kendali yang baik, dengan *error* yang rendah, waktu respon yang sesuai dengan *setpoint*, serta perilaku tanpa *overshoot* yang berarti. Oleh karena itu, sistem dapat dikategorikan stabil, efisien, dan mampu menjaga kondisi lingkungan hidroponik tetap berada dalam rentang optimal bagi pertumbuhan tanaman.

G. Tampilan Alat Hidroponik



GAMBAR 15
Alat Hidroponik

Alat yang dirancang pada penelitian ini merupakan sistem hidroponik otomatis berbasis *Internet of Things (IoT)* dengan penerapan metode *fuzzy logic* Mamdani untuk pengendalian suhu dan cahaya. Sistem ini terdiri dari sebuah instalasi hidroponik bertingkat empat yang disusun secara vertikal, dimana setiap rak menampung delapan tanaman dengan jenis tanaman selada dan pakcoy.

Untuk pengendalian lingkungan tumbuh, alat ini dilengkapi dengan dua sensor utama, yaitu sensor suhu DHT22 yang berfungsi untuk mendeteksi suhu ruangan dan sensor cahaya BH1750 untuk mendeteksi intensitas pencahayaan. Kedua sensor ini dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan data dan pengendali aktuator secara otomatis.

Aktuator yang digunakan terdiri dari satu buah lampu *led grow light* yang terletak secara sentral di bagian atas sistem dan satu unit pompa air yang terhubung ke dua sprinkler, diletakkan di bagian atas dekat lampu LED untuk membantu pengaturan suhu melalui penyemprotan air secara periodik.

H. Tampilan Aplikasi Kodular



GAMBAR 16

Tampilan Aplikasi Kodular

Gambar 4.11 menunjukkan tampilan antarmuka pengguna (*user interface*) dari aplikasi Kodular yang dirancang untuk melakukan monitoring dan pengendalian otomatis pada sistem hidroponik berbasis *Internet of Things (IoT)*. Aplikasi Kodular ini berfungsi sebagai media *front-end* yang menghubungkan pengguna dengan sistem secara *real-time*, menampilkan data hasil pembacaan sensor serta status kontrol pompa air dan lampu *led grow light* secara langsung melalui jaringan internet.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan terhadap sistem pengendalian suhu dan cahaya tanaman hidroponik berbasis *Internet of Things (IoT)* menggunakan metode *fuzzy logic* mamdani, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem pengendalian suhu dan cahaya berhasil direalisasikan dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan, sensor DHT22 untuk suhu, sensor BH1750 untuk cahaya, serta aktuator pompa air dan *Led Grow Light* sebagai elemen pengendali. Sistem ini terintegrasi dengan aplikasi Kodular sehingga dapat melakukan pemantauan dan pengendalian secara *real-time* melalui jaringan *Internet of Things (IoT)*.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki tingkat akurasi di atas 95%, sedangkan sensor BH1750 mencapai akurasi antara 93-95% dibanding alat ukur referensi. Hal ini menunjukkan kedua sensor layak digunakan untuk pengendalian suhu dan cahaya secara otomatis dalam sistem hidroponik *indoor*.
3. Sistem fuzzy logic mamdani mampu mengatur kinerja pompa air berdasarkan kategori suhu dengan baik, yaitu

- pompa mati pada suhu $\leq 28^{\circ}\text{C}$, *delay* 3 menit pada suhu normal ($28-32^{\circ}\text{C}$), dan *delay* 1 menit pada suhu $\geq 32^{\circ}\text{C}$. Sistem mampu menurunkan suhu hingga stabil pada kisaran $28,5-29,1^{\circ}\text{C}$ dengan *error* rata-rata $0,6^{\circ}\text{C}$ (2%) serta waktu respon 1-4 menit, membuktikan respon kendali yang cepat dan adaptif.
4. Pada sisi pencahayaan, sistem *fuzzy logic* mampu mengontrol *Led Grow Light* secara otomatis sesuai kondisi lux yang terdeteksi. Lampu menyala saat intensitas cahaya ≥ 1.500 lux dan mati saat ≤ 1.500 lux, dengan waktu respon rata-rata 1-1,2 detik. Sistem mempertahankan intensitas cahaya pada kisaran 1.900-2.400 lux dari *setpoint* 2.200 lux, dengan *error* rata-rata 150 lux (5%) sehingga pencahayaan tanaman tetap stabil dan efisien energi.
 5. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu menghasilkan sistem pengendalian suhu dan cahaya otomatis yang adaptif, stabil, efisien, serta mendukung keberlanjutan budidaya hidroponik modern melalui integrasi metode *fuzzy logic* mamdani dan teknologi *Internet of Things (IoT)*.

REFERENSI

- [1] M. Cahyo, A. Prabowo, A. A. Janitra, dan N. M. Wibowo, "Sistem Monitoring Hidroponik Berbasis IoT Dengan Sensor Suhu, pH, dan Ketinggian Air Menggunakan ESP8266," 2023.
- [2] N. Alfahira, D. Triyanto, dan I. Nirmala, "SISTEM MONITORING DAN KENDALI TANAMAN HIDROPONIK INDOOR FARMING MENGGUNAKAN LED GROW LIGHT BERBASIS WEBSITE," vol. 9, 2021.
- [3] F. SURYATINI, S. PANCONO, S. B. BHASKORO, dan P. M. S. MULJONO, "Sistem Kendali Nutrisi Hidroponik berbasis Fuzzy Logic berdasarkan Objek Tanam," ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, vol. 9, no. 2, hlm. 263, Apr 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i2.263.
- [4] T. Suryana, "Mengukur Intensitas Cahaya dengan Menggunakan Sensor BH1750," 2021. [Daring]. Tersedia pada: <http://iot.ciwaruga.com>
- [5] G. J. Mardolina, A. Ejah, U. Salam, dan I. R. Sahali, "Rancang Bangun Smart Hydroponic Menggunakan ESP32 Berbasis Aplikasi Android," Jurnal EKSITASI, vol. 2, no. 2, hlm. 2023, 2023.
- [6] A. Thoriq, L. Hasta Pratopo, R. Mulya Sampurno, S. Hisyam Shafiyullah, dan I. Artikel, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Tanah Berbasis Internet of Things," 2022, doi: 10.19028/jtep.10.3.268-280.
- [7] T. Supriyanto dkk., "Sistem Pemberian Nutrisi Bayam Hidroponik Berbasis IoT Terintegrasi Telegram," 2021.
- [8] I. Pratiwi, "IMPLEMENTASI IOT UNTUK MONITORING TANAMAN HIDROPONIK (STUDI KASUS PRODI BIOLOGI UIN AR-RANIRY BANDA ACEH)," 2023.
- [9] R. Jannah dan Asran, "STUDI PENGARUH PENCAHAYAAN LAMPU PIJAR DAN LAMPU LED TERHADAP PERTUMBUHAN TANAMAN HIDROPONIK," vol. 12, 2023.
- [10] I. P. A. B. Artha Wiraguna, I. N. Setiawan, dan A. A. N. Amrita, "IMPLEMENTASI SISTEM PEMANTAUAN KUALITAS AIR DENGAN IOT DI PLANT FACTORY KEBUN PERCOBAAN FAKULTAS PERTANIAN UNIVERSITAS UDAYANA," Jurnal SPEKTRUM, vol. 9, no. 2, hlm. 71, Jun 2022, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2022.v09.i02.p9.
- [11] F. Firmansyah, B. Wibisana, H. P. Yusuf, M. Ziad Iqbal, dan R. S. Abqari, "Pertanian Cerdas Berbasis Internet of Things untuk Meningkatkan Produktivitas Tanaman Hidroponik," Jurnal Pengabdian Masyarakat Nusantara (JPMN), vol. 4, no. 2, hlm. 80–85, Agu 2024, doi: 10.35870/jpmn.v4i2.3084.
- [12] D. Rumalowak, Y. A. Lesnussa, dan F. Y. Rumlawang, "Penerapan Logika Fuzzy Metode Mamdani Untuk Menentukan Jumlah Produksi Ayudes (Studi Kasus: CV. Abadi Tiga Mandiri Ambon)," Pattimura International Journal of Mathematics (PIJMath), vol. 2, no. 1, hlm. 25–32, Apr 2023, doi: 10.30598/pijmathvol2iss1pp25-32.
- [13] H. Herpratiwi, M. Maftuh, W. Firdaus, A. Tohir, M. I. Daulay, dan R. Rahim, "Implementation and Analysis of Fuzzy Mamdani Logic Algorithm from Digital Platform and Electronic Resource," TEM Journal, vol. 11, no. 3, hlm. 1028–1033, Agu 2022, doi: 10.18421/TEM113-06.
- [14] N. A. Mulia, M. Hannats Hanafi, dan I. Arwani, "Implementasi Logika Fuzzy untuk Purwarupa Pengkondisian AC dan Lampu Otomatis pada Sebuah Ruang," 2018. [Daring]. Tersedia pada: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [15] A. Fatkhur, J. Sahertian, dan A. Sanjaya, "Implementasi Fuzzy Logic Mamdani Untuk Pengendalian Suhu dan Kelembapan Pada Terrarium Reptil dan Monitoring Berbasis IOT," Jul 2020.
- [16] A. Nuryudin, D. Irawan, dan R. P. Astutik, "SISTEM MONITORING DAN KONTROL NUTRISI TANAMAN DI HIDROPONIK NFT MENGGUNAKAN METODE FUZZY MAMDANI," Jurnal Teknik Elektro, vol. 17, no. 1, hlm. 44–50, 2024.